

Совместный анализ наземных и дистанционных данных при оценке структуры и состава лесов на примере западной части Подмоскovie*

М. Ю. Пузаченко, Т. В. Черненькова, Н. Г. Беляева

Институт географии Российской академии наук,
Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

Для цитирования: Пузаченко, М. Ю., Черненькова, Т. В., Беляева, Н. Г. (2020). Совместный анализ наземных и дистанционных данных при оценке структуры и состава лесов на примере западной части Подмоскovie. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (2), 303–313. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.205>

Для тестовой территории в центре Русской равнины (западный сектор Московской области) представлены результаты совместного анализа данных наземных исследований, мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли (МДДЗ) и цифровой модели рельефа (ЦМР). Выполнена оценка организации и ценотического разнообразия лесного покрова территории. На основе геоботанических описаний с помощью эколого-фитоценотического подхода выделены 38 синтаксонов в ранге групп ассоциаций. Общее качество дискриминации выделенных единиц по описаниям растительности от проективного покрытия видов составило 84.5%. Характеристики рельефа рассматривались в качестве одного из основных факторов природной дифференциации лесного покрова. Источником информации о высотах территории послужили данные SRTM v.3, для которых были рассчитаны характеристики рельефа (уклоны, кривизны, освещенности) различных уровней иерархической организации. Качество дискриминации синтаксонов растительности на основе характеристик рельефа составило 49.6%. В качестве МДДЗ использованы снимки Landsat 5 и 8, а также спектральные индексы, рассчитанные на основе каналов съемки. Качество дискриминантного анализа в этом случае составило 49.8%. Качество дискриминации, проведенной при совместном анализе характеристик рельефа и ДДЗ, составило 64.6% от исходно определенных синтаксонов. Таким образом, совместное использование информации о рельефе и МДДЗ улучшило разделение выделенных классов на 15%. Построена карта типологического разнообразия растительного покрова исследуемой территории, характеризующая пространственную структуру и состав лесного покрова региона. Выделены основные характеристики рельефа, которые в совокупности определяют условия местообитания и, в значительной степени, дифференцируют рассматриваемые группы ассоциаций в пространстве.

Ключевые слова: МДДЗ, ЦМР, дискриминантный анализ, наземные исследования, классификация, типология лесов, картографирование, лесной покров, Московская область.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН (тема № 0148-2019-0007) в части изучения состава лесных сообществ и при поддержке Российского научного фонда (грант №18-17-00129) в части пространственного анализа биоразнообразия лесов. Для хранения и анализа материалов полевых геоботанических описаний использована база данных «FORDIV» (свид. о гос. регистрации № 2014620979). Авторы благодарят коллег, принявших участие в ее наполнении.

1. Введение

В настоящее время применение мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли (МДДЗ) при оценке свойств наземного покрова является повсеместной практикой в разных отраслях знаний. Качество анализа МДДЗ и интерпретации его результатов определяется доступностью и полнотой источников информации. В лесном хозяйстве России основными источниками информации являются отраслевые материалы лесоустройства, включающие карты-схемы и планы лесонасаждений, лесоустроительные планшеты и таксационные базы данных с биометрическими параметрами выделов насаждений, топографические карты (Корец и др., 2000; Малышева, 2002; Общесоюзные нормативы..., 1992). В силу отраслевой специфики использование этих источников ограничивает определение по спутниковым данным состава сложных многоярусных насаждений, в том числе растительности подчиненных ярусов.

Внедрение в практику цифрового моделирования и количественных методов совместного анализа полевой, дистанционной и картографической информации позволяет с большей детальностью и точностью отразить современное состояние лесного покрова и его отдельных характеристик.

В мировой практике распространены разнообразные методы пространственной интерполяции характеристик растительного покрова: метод *максимального правдоподобия* (Капралов и др., 2010); метод минимальных расстояний или *k ближайших соседей* (*k*-Nearest Neighbors, *k*NN), особенности использования и недостатки которых освещены в литературе (Книжников и др., 2004; Померанцев, 2011). С этой целью также используются дискриминантный, факторный, нейросетевой и генетический анализы. Однако применение более сложных алгоритмов (нейронных сетей, декомпозиции спектральных смесей, генетического анализа) связано со сложностью компьютерной обработки (необходимость специального пакета, трудоемкостью и др.), что ограничивает их применение как стандартных методик.

При наличии данных полевых исследований используется *метод интерполяции* точечных полевых данных на территории ландшафтного и регионального уровней. Основой для этого являются количественные методы анализа с возможностью совмещения данных в ГИС-среде (Козлов и др., 2008; Пузаченко, 2006). Применение пошагового канонического дискриминантного анализа (Тюрин и Макаров, 1998), помимо интерполяции дискретных значений исследуемого показателя как на основе МДДЗ, так и других переменных (рельефа, гидрографии и пр.), позволяет оценить пространственную неопределенность дискриминации, а также получить новые переменные (дискриминантные оси), отражающие факторы дифференциации исследуемого параметра и имеющие физическую интерпретацию на основе корреляции с переменными в анализе. Число площадок в обучающей выборке для получения достоверного результата алгоритмом дискриминантного анализа существенно меньше, чем при использовании других распространенных методов классификации с обучением.

Целью работы является выявление типологического разнообразия лесов западного сектора Московской области и закономерностей их распределения в зависимости от значений морфометрических характеристик рельефа на основе многомерного анализа данных с использованием МДДЗ, цифровой модели рельефа

(ЦМР) и данных полевых измерений. Настоящая работа является продолжением исследований разнообразия растительного покрова и факторов его формирования, результаты которых изложены ранее на примере северотаежных лесов центральной части Мурманской области (Пузаченко и Черненко, 2016).

2. Материалы и методы

Для демонстрации оценки пространственной организации лесной растительности выбрана тестовая территория в центре Русской равнины, занимающая площадь 40 532 км² — большую часть Московской области, за исключением ее восточной части. В соответствии с имеющимися схемами геоботанического районирования по территории Подмоскovie проходят границы широколиственно-хвойной и широколиственной лесных зон. Современный рельеф исследуемой территории определяют ледниковые и водноледниковые формы рельефа, сформировавшиеся в разные ледниковые эпохи и неодинаково переработанные эрозионно-денудационными процессами. С юго-запада на северо-восток область пересекает граница Московского оледенения (Смоленско-Московская возвышенность), к северу от нее распространены ледниково-эрозионные формы с моренными грядами, а к югу — эрозионные формы рельефа.

При реализации применяемого подхода использован пошаговый дискриминантный анализ, в результате которого определяются переменные, разделяющие в наибольшей степени выделенные типы растительных сообществ. Из-за ограничений, диктуемых объемом выборки, в ходе анализа использована относительная оценка точности дискриминации по всему объему выборки. Эталонном для обучения при оценке типологического разнообразия служила совокупность полевых описаний, сгруппированных по признакам эколого-морфологического состава растительности лесных сообществ. Использование классификации лесной растительности на основе эколого-фитоценологического подхода обеспечило хорошее соответствие между типологическими единицами и их пространственным масштабом. Наличие статистически значимых взаимосвязей между локализованными в точках описаний синтаксономическими единицами наземного покрова и квазинепрерывными переменными, описывающими характеристики среды (МДДЗ, ЦМР), позволяет провести интерполяцию их значений для всей территории исследований, а также интерпретировать отображаемое ими пространственное варьирование с точки зрения различных факторов.

В качестве дистанционных данных использованы безоблачные сцены МДДЗ Landsat 5 и 8 за последние годы съемки. Так как территория исследований покрывается тремя сценами съемки, выполнено построение мозаик снимков с радиометрическим выравниванием сцен по их гистограммам. Мозаики созданы за три срока съемки: 1 — конец марта 2014 г. (Landsat 8), 2 — конец августа 2011 г. (Landsat 5) и 3 — середина сентября 2014 г. (Landsat 8). На основе каналов данных дистанционного зондирования (ДЗ) для каждого срока съемки рассчитывались индексы, отражающие различные аспекты мультиспектральной информации, представленные в программе ENVI 5 (Пузаченко и Черненко, 2016).

В качестве ЦМР использованы данные SRTM v3 с исходным разрешением 1 арк сек (около 30 м). Данные поступали фрагментами и были впоследствии объ-

единены в единый слой. В нашем случае территория исследований перекрывается двенадцатью фрагментами ЦМР. Для дальнейшего совмещения с МДДЗ выполнено преобразование ЦМР из долготно-широтной проекции в проекцию Меркатора (UTM37 WGS84).

Воздействие различных факторов (поверхность кровли коренных пород, деятельность ледников, эрозионные процессы и др.) приводит к образованию структур рельефа со своими характерными линейными размерами. Спектральный анализ, основанный на двухмерном преобразовании Фурье (Пузаченко, 2004), позволил представить абсолютные высоты рельефа в виде волн, разложить их по отдельным частотам и охарактеризовать степень выраженности каждой частоты через ее амплитуду, благодаря чему выявляются иерархические уровни пространственной организации рельефа (Turcotte, 1997). При этом на каждом уровне наблюдается свое разнообразие формирующих процессов (Wu and Qi, 2000). Расчет и анализ двумерного спектра показал наличие двенадцати статистически выраженных иерархических уровней организации рельефа и тренд. Так выделены структуры со средними линейными размерами 300, 540, 780, 1140, 1500, 2220, 3180, 3900, 5100, 7260, 9900 м и более 20 км. Для каждого из выделенных уровней организации рельефа рассчитывались высоты и производные характеристики рельефа.

Совмещение МДДЗ и ЦМР, как и вся предварительная подготовка данных, осуществлялись в программе Erdas Imagine. После совмещения в соответствии с масштабом исследований и результирующих картографических материалов проводилось агрегирование исходного пространственного разрешения данных до 60 м. Точки описаний (с присвоенными им определенными классификационными значениями) совмещались с ближайшими к ним точками данных на основе координат, формируя, таким образом, обучающую выборку.

В анализе использованы результаты полевых описаний (1087 точек), расположенных в основном на севере, западе и юго-западе исследуемой территории. Локализация точек связана с покрытием наземными исследованиями разнородных по составу растительности и генезису подстилающих пород территорий, а также с их доступностью. Типы наземного покрова, не представленные в описаниях (поля, водные объекты, населенные пункты), добавлены в обучающую выборку на основе визуального анализа МДДЗ. Таким образом, получено 1712 точек, используемых в обучающей выборке.

3. Результаты

В результате эколого-фитоценотической классификации полевых описаний исследуемой территории получено 18 синтаксонов на уровне формаций и 38 синтаксонов на уровне групп ассоциаций (прил. 3.1¹). Относительное качество дискриминации выделенных групп ассоциаций по проективному покрытию видов составило 84.5 %, что подтверждает адекватность классификации исходных данных. Точность классификации варьировала в зависимости от сукцессионной стадии и происхождения группируемых в типологические единицы сообществ. Сложный полидоминантный состав древесного яруса и определенное сходство организации

¹ Здесь и далее приложения 3.1 и 3.2 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/5360/5437>. Приложения даны в авторской редакции.

подчиненных ярусов сообществ обуславливает перекрывание синтаксонов по видам и их обилию.

Относительное качество дискриминации групп ассоциаций от квазинепрерывных данных (МДДЗ и ЦМР) составило 64.6%. Лучшее качество дискриминации (75–100%) отмечено для сообществ с выраженными контрастными свойствами местообитания, в частности, экотопов с избыточным увлажнением (для групп ассоциаций сосняков кустарничково-сфагновых, осинников с елью и дубом влажнотравных и сероольшаников влажнотравных). Худшее качество дискриминации характерно для лесов с широколиственным и мелкотравно-широколистным травяным ярусом, а также для лесов с участием дуба и ели. Этот факт объясняется производным статусом лесов Московского региона в целом, а также высокой долей лесов искусственного происхождения (17.5% на 2009 г.) (Лесной план..., 2010). Основными плантационными породами являются хвойные виды деревьев, в основном ель. Прохождение стадии созревания лесов хвойно-широколиственной зоны, как в случае спонтанной сукцессии, так и искусственных насаждений происходит при формировании травяного покрова с большой долей бореальных видов при дальнейшем их замещении неморальным широколиственным. В этой связи дискриминантный анализ отражает объективную ситуацию сукцессионной мозаики лесного покрова с перекрытием видовых спектров как древесного, так и наземных ярусов, что соответствует естественной картине общей континуальности растительного покрова и сложности выделения относительно дискретных единиц.

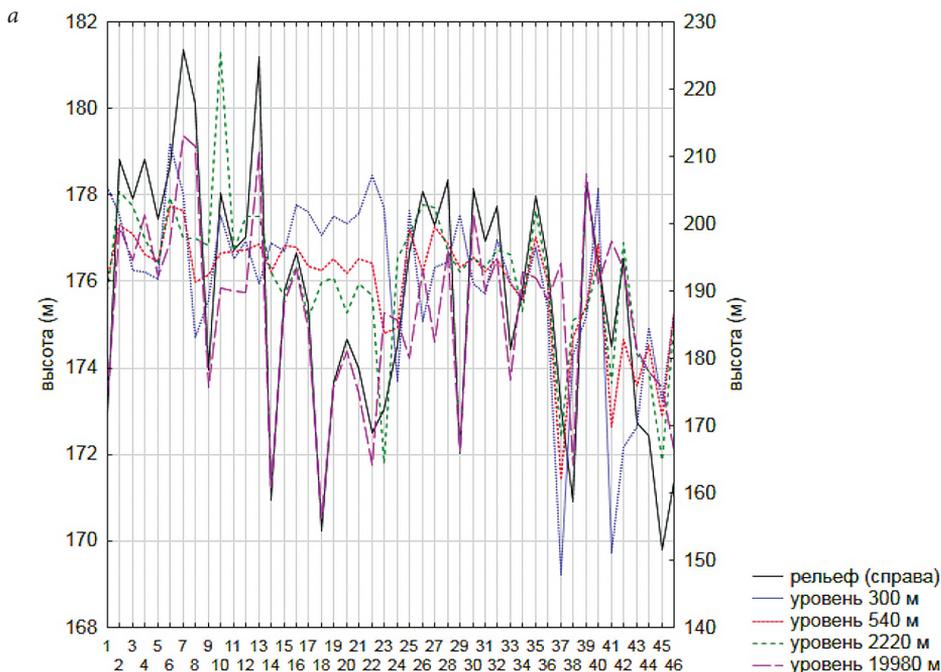
Результаты интерполяции в рамках дискриминантного анализа классов растительности дают возможность отобразить пространственное распределение растительного покрова (прил. 3.2). Лесопокрытая площадь исследуемой территории составила 55%, почти половина ее — это леса с преобладанием мелколиственных пород, представленные длительно производными березовыми с елью и осиной сообществами. Еловые неморальные и субнеморальные сообщества занимают около 13%, сообщества с участием сосны — около 9%, коротко производные елово-мелколиственные сообщества — около 6%. Неморальные сообщества с участием широколиственных пород занимают около 8% территории (в их составе липовые (3.6%) и дубовые (2.7%)).

Распространение ряда сообществ (например, еловых и елово-мелколиственных мелкотравно-широколистных, елово-мелколиственных, широколиственно-еловых и осиновых с елью и дубом широколиственных) слабо зависело как от МДДЗ, так и от характеристик рельефа (дискриминация около 20%) (прил. 3.1). Часть сообществ показывали более высокий уровень связи с рельефом, чем с МДДЗ и ЦМР совместно (еловые кустарничково-мелкотравно-зеленомошные и мелкотравно-зеленомошные, еловые с дубом и липой мелкотравно-широколиственные, еловые с сосной мелкотравно-широколиственные, сосновые мелкотравные, дубовые с липой, елью и березой широколиственные, липовые с дубом широколиственные и липовые с елью и березой широколиственные). Более высокий уровень связи с МДДЗ, чем с ЦМР демонстрировали несколько растительных сообществ (еловые широколиственные, сосновые с липой, дубом и лещиной широколиственные, березовые с елью и осиной разнотравные), а также типов наземного покрова (поля, водные объекты и населенные пункты). Остальные сообщества имели схожий уровень связи как с МДДЗ, так и с ЦМР. В целом можно отметить более высокий уровень связи рас-

смаатриваемых классов сообществ и типов наземного покрова с ЦМР, нежели чем с МДДЗ (прил. 3.1).

Наиболее высокий уровень связи с ЦМР показывали еловые с дубом и липой мелкотравно-широкоотравные, еловые с сосной мелкотравно-широкоотравные, еловые с дубом и липой широкоотравные, елово-мелколиственные кустарничково-мелкотравные, сосновые разнотравные, сосновые кустарничково-сфагновые и осино-вые с елью и дубом влажнотравные сообщества. В дисперсионном анализе получено, что в наибольшей степени выделенные группы ассоциации и типы наземного покрова связаны с высотами для различных иерархических уровней рельефа, уклонами, различными кривизнами и освещенностью для уровней 300–1140 м (рис. 1, а). Наибольшие высоты для всех уровней организации рельефа отмечены для еловых и елово-мелколиственных широкоотравных лесов, наименьшие — для водных объектов, черноольшатников влажнотравных и лугов. Для остальных классов характерно сочетание высоких и низких значений высот для различных иерархических уровней организации рельефа. Так, например, для сосняков кустарничково-мелкотравно-зеленомошных характерны очень низкие значения высоты рельефа и его форм для уровня 19980 м, но большие значения высоты для уровня 300 м и средние для 540 и 2220 м.

Средние уклоны более 6° отмечены только для сосняков разнотравных. Уклоны более 2° характерны для сероольшатников влажнотравных, липняков с дубом широкоотравных, сосново-еловых мелкотравных, мелкотравно-широкоотравных и широкоотравных лесов. Наименьшие уклоны отмечены для водных объектов, населенных пунктов, березняков с елью и осинкой мелкотравных, сосново-еловых кустарничково-мелкотравно-зеленомошных, сосновых кустарничково-мелкотравно-зеленомошных и еловых мелкотравно-зеленомошных лесов (рис. 1, б).



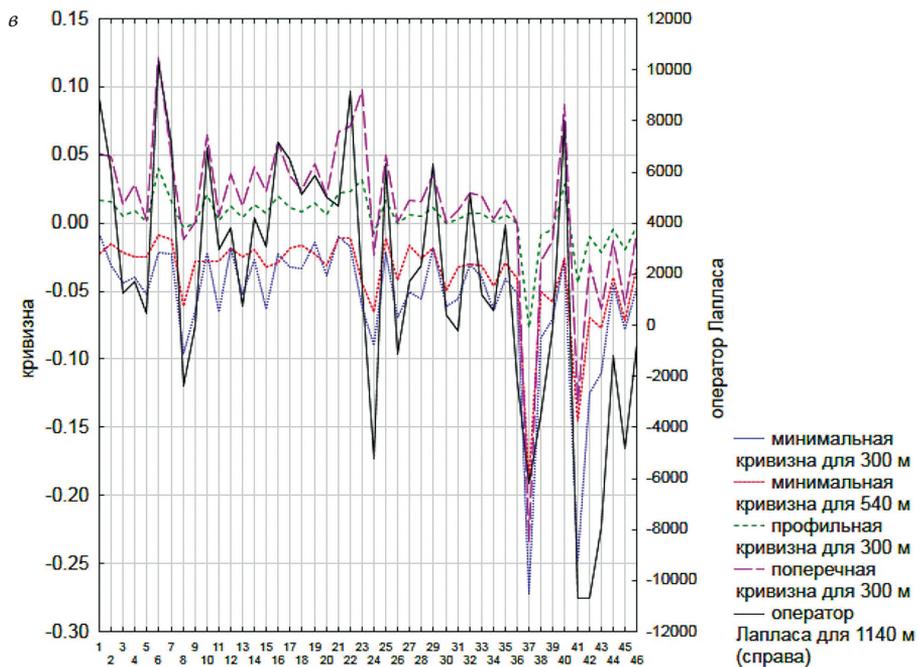
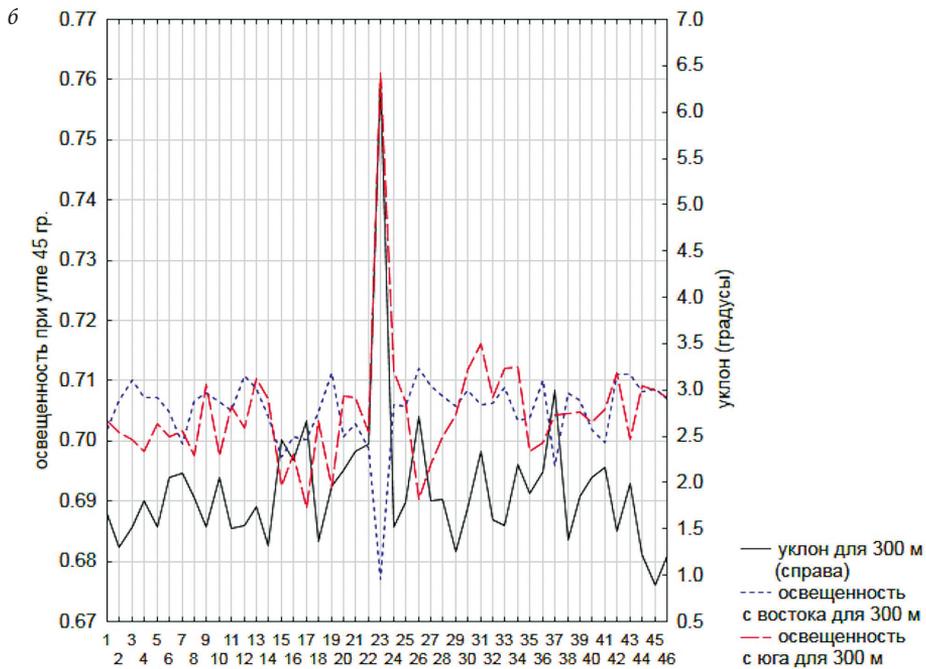


Рис. 1. Распределение разных типов сообществ в зависимости от характеристик рельефа: а — высота, м; б — освещенность; в — показатели кривизны поверхности и их производная (оператор Лапласа). По оси абсцисс — нумерация синтаксонов, соответствующая номерам в прил. 3.1

Освещенность при азимуте 90 и 180°, определяющаяся экспозицией, максимальна для сосняков разнотравных, характерных для местообитаний с наибольшими величинами уклонов рельефа и юго-западной ориентацией склонов. Наименьшая освещенность с востока и юга отмечается для сосново-еловых мелкотравных и широколиственных лесов, занимающих, соответственно, склоны северо-западной ориентации (рис. 1, в).

Наиболее выпуклые формы рельефа были характерны для ельников с сосной мелкотравно-широколиственных, сосняков с липой, дубом и лещиной широколиственных, ельников кустарничково-мелкотравно-зеленомошных и вырубков разнотравных (рис. 1, в), наиболее вогнутые — для сероольшатинок влажнотравных, лугов, открытых заболоченных местообитаний, ивняков влажнотравных, сосняков кустарничково-сфагновых, черноольшатинок влажнотравных и осинников с елью и дубом влажнотравных.

4. Заключение

Возможности оценки ценоотического разнообразия лесного покрова и факторов его формирования на основе совместного анализа данных наземных исследований, дистанционной информации и цифровой модели рельефа продемонстрированы на примере Московского региона. Используемая методика позволила для исследуемой территории оценить состав и распределение лесных сообществ сложного полидоминантного состава, находящихся на разных сукцессионных стадиях. Показатели состава и структуры лесного покрова оценены на количественной основе методом канонического дискриминантного анализа. Применяемая на стадии типизации сообществ эколого-фитоценоотическая классификация обеспечила хорошее соответствие типологических и картографируемых единиц на региональном уровне. В результате выделено 38 типов лесных сообществ, отражающих особенности организации лесных экосистем, их эколого-ценоотические спектры и свойства местообитания. Качество дискриминации выделенных групп ассоциаций на основе видовых списков с учетом проективного покрытия видов составило 84.5 %, что подтверждает адекватность классификации исходных данных.

Относительное качество дискриминации выделенных единиц от пространственно распределенных данных (МДДЗ и ЦМР) составило 64.6 %. С наибольшей точностью (80–100 %) распознавались сообщества с выраженными контрастными свойствами местообитания, в частности, экотопов с избыточным увлажнением (группы ассоциаций сосняков кустарничково-сфагновых, осинников с елью и дубом и сероольшатинок влажнотравных).

Получены характеристики рельефа различных иерархических уровней, которые в совокупности определяют условия местообитания и, в значительной степени, особенности распространения растительного покрова. Основными дифференцирующими характеристиками рельефа являются высоты для различных иерархических уровней, уклоны, кривизны и освещенность для иерархических уровней с линейными размерами 300–1140 м. Выявлены группы лесных сообществ, распределение которых в наибольшей степени связано с варьированием морфометрических характеристик рельефа. Так, наибольшие уклоны и приуроченность к юго-западной экспозиции характерны для сосняков разнотравных. Еловые и елово-мелколи-

ственные широколиственные леса приурочены к наибольшим высотным диапазонам, черноольшаники влажнотравные и луга — к наименьшим. Заболоченные местообитания и влажнотравные сообщества приурочены к вогнутым поверхностям. В то же время для ряда типов сообществ, главным образом производных или предположительно культур, не наблюдается связи с особенностями поверхности рельефа.

Использованные методы и полученные результаты позволяют количественно охарактеризовать набор ландшафтных условий как значимый природный фактор, влияющий на пространственную дифференциацию современного лесного покрова, проявляющийся даже в столь антропогенно нарушенном Московском регионе. Выявление связи состава сообществ с типами местообитаний и ландшафтными особенностями, морфометрическими показателями рельефа дает возможность ретроспективно выявить траектории развития сообществ, а также установить направления сукцессионной динамики лесного покрова в будущем.

Литература

- Капралов, Е. Г., Кошкарев, А. В., Тикунов, В. С., Глазырин, В. В., Заварзин, А. В., Замай, С. С., Лурье, И. К., Охонин, В. А., Пырьев, В. И., Рыльский, И. А., Семин, В. Н., Серапинас, Б. Б., Симонов, А. В., Трофимов, А. М., Флейс, М. Э., Якубайлик, О. Э., Яровых, В. Б. (2010). *Геоинформатика*. Москва: Академия.
- Книжников, Ю. Ф., Кравцова, В. И., Тутубалина, О. В. (2004). *Аэрокосмические методы географических исследований*. Москва: Академия.
- Козлов, Д. Н., Пузаченко, М. Ю., Федяева, М. В., Пузаченко, Ю. Г. (2008). Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа. *Известия РАН. Серия географическая*, (4), 112–124.
- Корец, М. А., Черкашин, В. П., Рыжкова, В. А. (2000). Методы индикации экологических характеристик лесных территорий по данным со спутника «Ресурс-01» с использованием ГИС. *Исследование Земли из космоса*, (5), 74–81.
- Лесной план Московской области. Кн. 1*. (2010). Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства.
- Малышева, Н. В. (2002). Дистанционное зондирование для изучения лесных экосистем, учета, контроля и управления лесными ресурсами. *Лесохозяйственная информация*, (1), 31–61.
- Общесоюзные нормативы для таксации лесов*. (1992). Москва: Космос.
- Померанцев, А. (2011). *Классификация*. [online] Российское Хемометрическое Общество. Доступно на: <https://rcs.chemometrics.ru/old/Tutorials/classification.htm> [Дата доступа 14.06.2020].
- Пузаченко, Ю. Г. (2004). *Математические методы в экологических и географических исследованиях*. Москва: Академия.
- Пузаченко, Ю. Г. (2006). Наука и концепция устойчивого развития. В: *Труды международной школы-конференции «Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология»*. Москва: МГУ имени М. В. Ломоносова, 4–80.
- Пузаченко, М. Ю., Черненькова, Т. В. (2016). Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 13 (5), 167–191. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191>
- Тюрин, Ю. Н., Макаров, А. А. (1998). *Статистический анализ данных на компьютере*. Москва: ИНФРА-М.
- Turcotte, D.L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wu, J. and Qi, P.Y. (2000). Dealing with scale in landscape analysis: an overview. *Geographic Information Sciences*, 6 (1), 1–5.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2019 г.
Статья рекомендована в печать 10 февраля 2020 г.

Контактная информация:

Пузаченко Михаил Юрьевич — puzak@bk.ru

Черненко Татьяна Владимировна — chernenkova50@mail.ru

Беляева Надежда Георгиевна — n.vin@mail.ru

Joint analysis of field and remote data in assessing the structure and composition of forests for the western part of Moscow region*

M. Yu. Puzachenko, T. V. Chernenkova, N. G. Belyaeva

Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyi per., Moscow, 119017, Russian Federation

For citation: Puzachenko, M. Yu., Chernenkova, T. V., Belyaeva, N. G. (2020). Joint analysis of field and remote data in assessing the structure and composition of forests for the western part of Moscow region. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (2), 303–313.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.205> (In Russian)

For the test area in the central part of the Russian Plain (the western sector of Moscow region), the results of a joint analysis of field research data, multispectral remote sensing data (MRSD) and a digital elevation model (DEM) are presented. An assessment of the organization and coenotic diversity of the forest cover of the territory has been carried out. A total of 38 syntaxons with the rank of association groups were identified based on relevés, using the ecological-phytocoenotic approach. The overall quality of discrimination of the selected units according to the relevés and species cover was 84.5%. The relief characteristics were considered one of the main factors of the natural differentiation of forest cover. The source of information about the altitudes of the territory was the SRTM v.3 data, for which the relief characteristics (slopes, curvatures, illuminances) of various levels of hierarchical organization were calculated. The quality of discrimination of syntaxons based on the relief characteristics was 49.6%. Landsat 5 and 8 images, as well as indices calculated based on spectral bands, were used as remote sensing data. The quality of the discriminant analysis in this case was 49.8%. The quality of discrimination carried out in a joint analysis of the characteristics of relief and MRSD amounted to 64.6% of the originally defined syntaxons. Thus, the sharing of information about the relief and MRSD improved the separation of the selected classes by 15%. The map of typological diversity of the vegetation cover for the studied territory was calculated, which characterizes the spatial structure and composition of the forest cover of the studied region. The main characteristics of the relief, which together define the conditions of habitat and, largely, differentiate the considered groups of associations in space, are highlighted.

Keywords: MRSD, DEM, discriminant analysis, ground-based research, classification, typology of forests, mapping, forest cover, Moscow region.

References

All-Union Standards for Forest Taxation. (1992). Moscow: Kosmos Publ. (In Russian)

Forest plan of Moscow region. Book 1. (2010). Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo khoziaistva Publ. (In Russian)

Kapralov, E. G., Koshkarev, A. V., Tikunov, V. S., Glazyrin, V. V., Zavarzin, A. V., Zamai, S. S., Lur'è, I. K., Okhonin, V. A., Pyr'ev, V. I., Ryl'skii, I. A., Semin, V. N., Serapinas, B. B., Simonov, A. V., Trofimov, A. M.,

* This research was carried out within the state assignment of Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (no. 0148-2019-0007) and supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00129).

- Fleis, M. E., Iakubailik, O. E. and Iarovykh, V. B. (2010). *Geoinformation*. Moscow: Akademiia Publ. (In Russian)
- Knizhnikov, Iu. F., Kravtsova, V. I. and Tutubalina, O. V. (2004). *Aerospace methods of geographical research*. Moscow: Akademiia Publ. (In Russian)
- Korets, M. A., Cherkashin, V. P. and Ryzhkova, V. A. (2000). Methods of indicating the ecological characteristics of forest areas according to data from the Resurs-01 satellite using GIS. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, (5), 74–81. (In Russian)
- Kozlov, D. N., Puzachenko, M. Iu., Fediaeva, M. V. and Puzachenko, Iu. G. (2008). Display of spatial variation of the properties of the landscape cover on the basis of remote information and the digital relief model. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriiia geograficheskaiia*, (4), 112–124. (In Russian)
- Malysheva, N. V. (2002). Remote sensing for the study of forest ecosystems, accounting, control and management of forest resources. *Lesokhoziaistvennaia informatsiia*, (1), 31–61. (In Russian)
- Pomerantsev, A. (2011). *Classification*. [online] Russian Chemometrics Society. Available at: <https://rcs.chemometrics.ru/old/Tutorials/classification.htm> [Accessed 14 Jun. 2020]. (In Russian)
- Puzachenko, Iu. G. (2004). *Mathematical methods in ecological and geographical studies*. Moscow: Akademiia Publ. (In Russian)
- Puzachenko, Iu. G. (2006). Science and the concept of sustainable development. In: *Proceedings of an international conference school "Landshaftnoe planirovanie. Obshchie osnovaniia. Metodologiia. Tekhnologiia"*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 4–80. (In Russian)
- Puzachenko, M. Iu. and Chernenkova, T. V. (2016). Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 13 (5), 167–191. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191> (In Russian)
- Tiurin, Iu. N., Makarov, A. A. (1998). *Statistical analysis of data on a computer*. Moscow: INFRA-M Publ. (In Russian)
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wu, J. and Qi, P. Y. (2000). Dealing with scale in landscape analysis: an overview. *Geographic Information Sciences*, 6 (1), 1–5.

Received: April 2, 2019
Accepted: February 10, 2020

Contact information:

Michail Yu. Puzachenko — puzak@bk.ru
Tatiana V. Chernenkova — chernenkova50@mail.ru
Nadezda G. Belyaeva — n.vin@mail.ru